4.2. ELEMENTOS MAYORES

4.2.1. Aniones

4.2.1.1. Sulfatos

En términos generales para toda el área de estudio se registran valores elevados de sulfatos tomando en consideración que un número importante de aprovechamientos son utilizados con fines de abastecimiento público, sin embargo, la situación respecto a este tópico es común tomando en cuenta las características del área de estudio, sobre todo la litología, que como ya se ha establecido anteriormente se cuenta con cantidad considerable de yeso mezclado con otros minerales dentro del aluvión que conforma la litología del acuífero.

La distribución de las concentraciones de los sulfatos está hasta cierto punto bien definida, teniéndose principalmente tres zonas con diferencias significativas en los valores de sulfato. En primer lugar y hacia la parte más occidental del área, es decir, en los aprovechamientos cercanos a la Sierra de Catorce como ya se ha establecido, se encuentran aprovechamientos con las concentraciones más bajas, estas concentraciones son inferiores a los 450 mg/l que es el límite máximo permisible marcado por la Norma Mexicana de Calidad del Agua para Uso y Consumo Humano (NOM-127-SSA1-1994). La segunda zona está definida por valores más elevados de sulfatos respecto a la zona anterior (Sierra de Catorce) localizada en las inmediaciones de Cedral, presentándose valores de hasta 2049 mg/l en el primer muestreo y un promedio de 740.5 para el primer muestreo y 623 mg/l para el segundo muestreo. La tercera zona presenta los valores más elevados de sulfatos, alcanzando los 2850 mg/l como valor máximo y un promedio de 1896 mg/l y 1698 mg/l para el primer y segundo muestreo respectivamente. Los aprovechamientos con los valores más altos se encuentran principalmente en la Ciudad de Matehuala tal como se aprecia en las figuras 22 y 23.

Dentro de la zona Cedral se tienen dos puntos donde los concentraciones de sulfato se disparan fuertemente comparándolos con los aprovechamientos adyacentes por lo que sus valores resultan anómalos dentro de la zona donde se sitúan, estos son los

aprovechamientos marcados como m7 y m18 y corresponde el primero a la población de Cerro de Flores, y el segundo a la zona agrícola de Cedral donde los 1844 y los 2049 mg/l de sulfato respectivamente contrastan con los valores obtenidos en los aprovechamientos vecinos donde se tiene como promedio un valor de 740 mg/l de sulfato

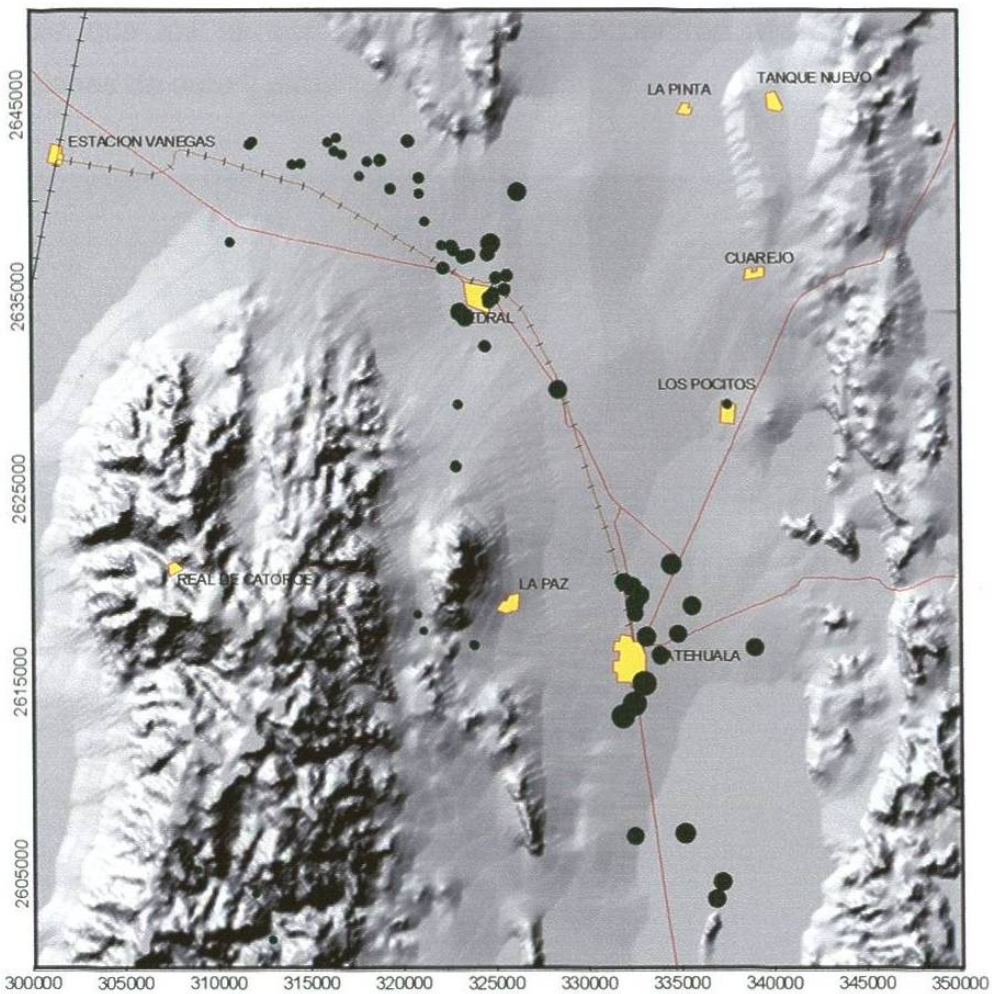

Figura 22. Concentración de sulfato. El tamaño de los círculos es proporcional a la concentración.
18 mg/l ●
1850mg/l ●

Como se aprecia en la figura 22, en el norte de Cedral donde se localizan los pozos operados por SAPSAM las concentraciones de sulfato se encuentran dentro del límite marcado por la norma mexicana, también se puede observar como la totalidad de las muestras tomadas en Matehuala y sus cercanías sobrepasan dicho valor, lo

que explica el por qué los pozos de la zona de Matehuala no son usados con fines potables, aunque algunos aprovechamientos particulares, principalmente norias, si funcionan como proveedores de agua potable para las familias que son propietarias de tales aprovechamientos. Los pozos con las concentraciones más altas se utilizan principalmente para propósitos agrícolas y/o pecuarios tanto en Cedral como en Matehuala, aunque esta práctica no ofrece algún peligro importante para la salud, es muy posible que los terrenos de cultivo se encuentren afectados por las altas concentraciones de este y otros compuestos.

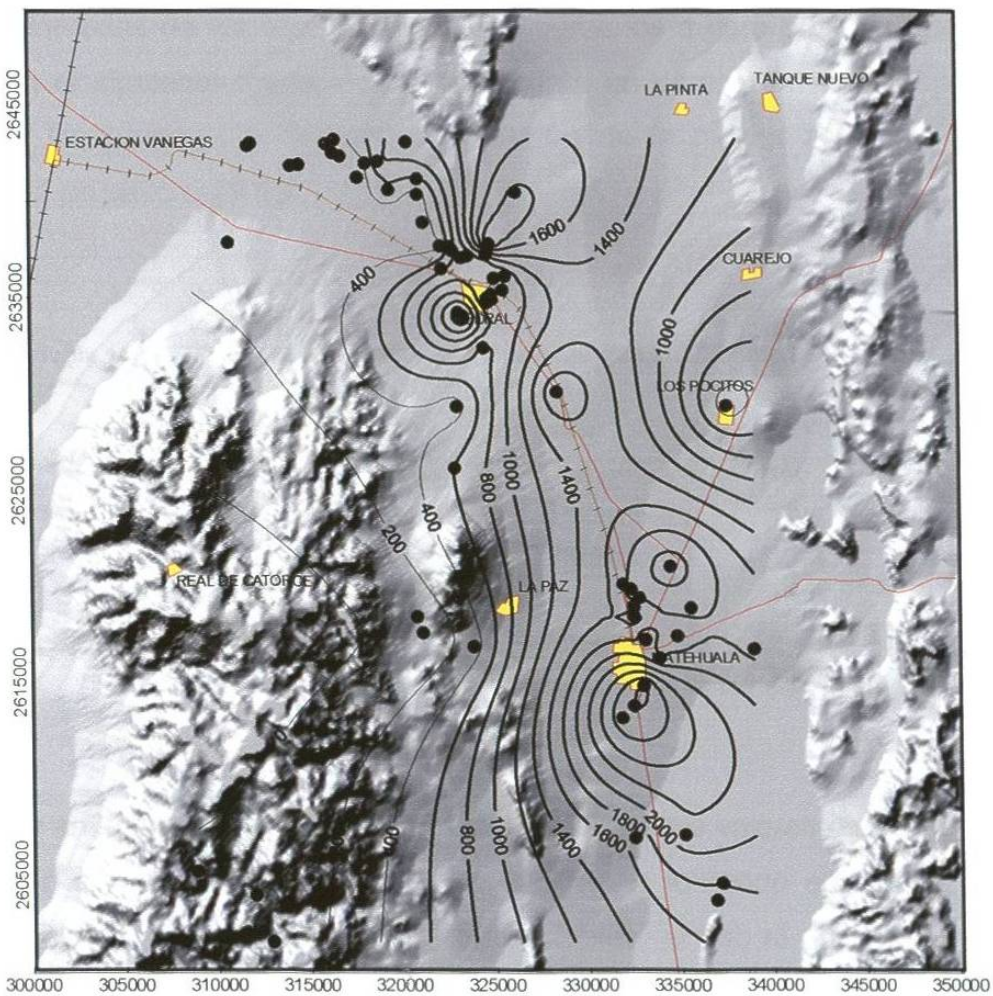

Figura 23. Mapa de isovalores de sulfatos (mg/l).

4.2.1.2. Cloruros

El comportamiento de la distribución de cloruros es relativamente uniforme de manera análoga al comportamiento de los iones expuesto con anterioridad.

Generalmente se presentan concentraciones bajas dentro de toda el área de estudio, no muestran problema con el límite establecido por la norma mexicana (250 mg/l Cl^-). La mayor parte de los valores altos de cloruro registrados (Tabla 11) y que sobrepasan dicho límite se ubican dentro de la ciudad de Matehuala (Fig.24); el agua extraída de tales aprovechamientos (m39, m55 y m56) se destina principalmente a la agricultura y ganadería. Un aprovechamiento más en el ejido Cerro de Flores (m7) presenta concentraciones superiores a la norma como se muestra en la misma figura y se utiliza con fines agrícolas; al igual que el exceso de sulfato en la misma muestra, el alto contenido de cloruro corresponde a una situación diferente a la de las muestras tomadas de los aprovechamientos cercanos a este pozo ya que como se aprecia en el siguiente mapa, este no presenta un comportamiento esperado con relación a los pozos o norias ubicados dentro de la misma zona por lo que se considerará un caso especial.

Tabla 11. Muestras con valores de cloruro mayores a 250* mg/l

Muestra	Cl mg/l	Tipo	Uso	Prof.m.
m7	364	Pozo	Agropecuario	150
m39	530	Pozo	Pecuario	120
m47	259	Pozo	Agrícola	100
m55	366	Pozo	Agrícola	126
m56	508	Pozo	Pecuario	--

*El límite máximo establecido por la norma mexicana es de 250 mg/l de Cl^-.

En la tabla anterior se puede apreciar que el rango de los valores elevados de cloruro sobrepasan apenas 2 veces el límite establecido, y tomando en cuenta que estos aprovechamientos no se utilizan con fines potables, el uso al que se destinan está adecuado con su calidad.

Los valores de cloruro registrados en la segunda etapa de muestreo para las mismas sitios de la tabla 11 no sufrieron fluctuaciones considerables sino que se mantuvieron estrechamente cercanos a los presentados en la primera etapa de muestreo.

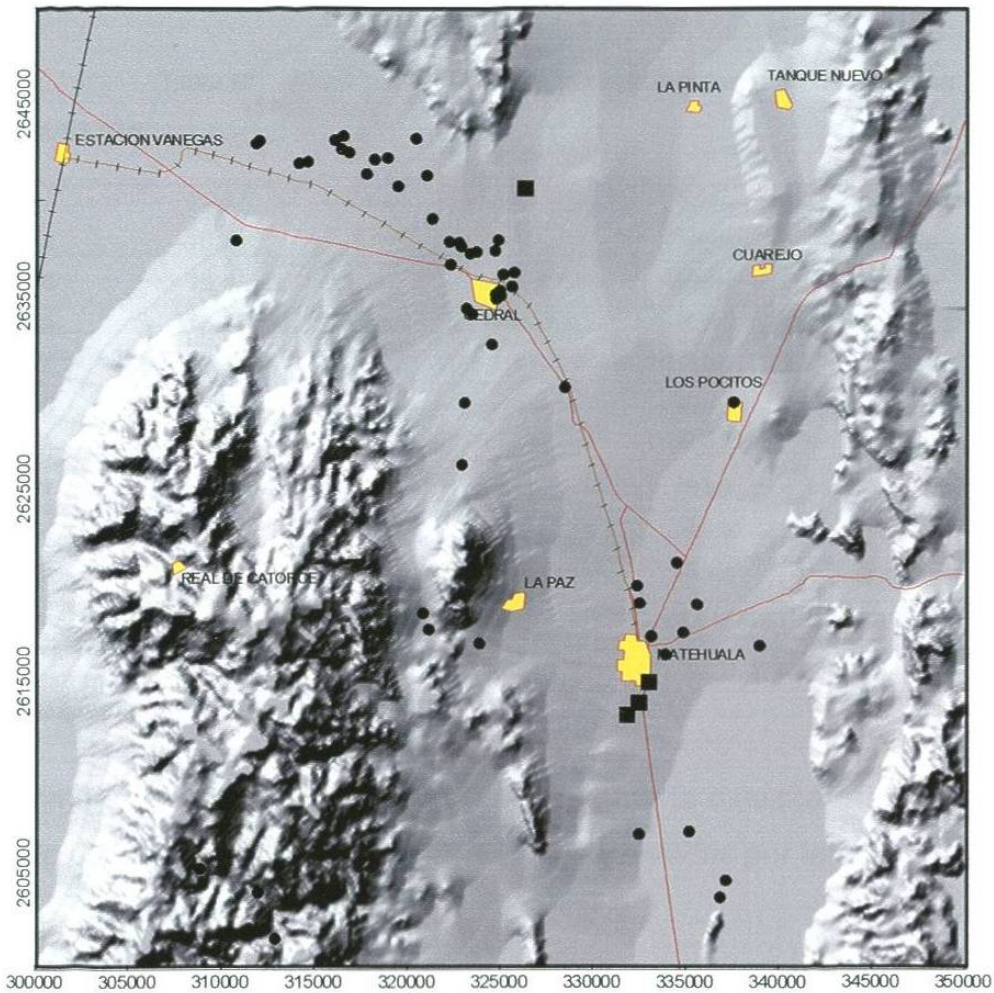

Figura 24. En el mapa los círculos muestran los aprovechamientos donde las concentraciones de cloruros están dentro del límite marcado por la norma mexicana, los cuadrados son los que sobrepasan los 250 mg/l de Cl.

4.2.1.3. Nitratos (como N)

En lo que respecta a la distribución de los nitratos en toda el área de estudio, se puede decir de acuerdo a los resultados que el comportamiento es relativamente uniforme, ya que 57 de los 67 aprovechamientos muestreados (15%) presentan un valor inferior al indicado por la norma mexicana (10 mg/l de NO_3-N). Los valores de las concentraciones de nitrato en los aprovechamientos restantes fluctúan entre los 10.2 mg/l y los 43.0 mg/l, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12. Muestras con valores de $N\text{-}NO_3$ por encima de la norma.

MUESTRA	$N\text{-}NO_3$ (mg/l)		UBICACIÓN	TIPO	USO	PROF. M
	1	2**				
M7	17.5	16.8	C. de Flores	Pozo	Agropecuario	150
M32	10.4	7.7	Limones	Manantial	Potable	—
M36	10.4	11.3	B. de Arriba	Pozo	Potable	—
M39	15.8	33.3	Matehuala	Pozo	Servicios	120
M47	18.4	27.4	Piedra Bca.	Pozo	Agrícola	—
M55	27.6	n.m	Matehuala	Pozo	Agrícola	126
M56	43.0	46.5	Matehuala	Pozo	Servicios	—
M57	10.2	10.9	Sarabia	Pozo	Pecuario	—
M58	15.5	15.7	E. de Abajo	Noria	Pecuario	24
m66	n.m	15.9	Ojo de Agua	Noria	Agropecuario	20.

El valor máximo indicado por la NOM-127-SSA1-1994. en Aguas Para uso y Consumo Humano es de10.0 mg/l de $N\text{-}NO_3$.
* primer muestreo (marzo 2003).
** segundo muestreo (noviembre 2003).

Como lo refleja la tabla anterior nuevamente la muestra m7 presenta una situación que difiere mucho de las demás muestras tomadas por la misma zona ya presentada en los anteriores resultados.

En la siguiente figura (Figura 25) se muestran la localización de los aprovechamientos muestreados y la distribución de las concentraciones de nitratos, en este se puede puntualizar que la característica que presentan los puntos con valores altos de $N\text{-}NO_3$ es que se encuentran dispersos a través de toda el área de estudio. Esto es un hecho importante a considerar, ya que no existe una zona definida contaminada por nitrato, sino que tal dispersión es un factor de riesgo que hace vulnerable a toda la zona para que este tipo de contaminación pudiera extenderse.

Aunque la situación no presenta tintes alarmantes puesto que el valor promedio para toda la zona es de 5.5 mg/l $N\text{-}NO_3$ la contaminación por nitratos se hace presente principalmente en pozos y norias situados dentro de tierras de cultivo más específicamente en la parte sur del área de estudio.

Otro aspecto interesante es que en uno de los manantiales situados en la Sierra de Catorce también se encuentra afectado por la contaminación con nitratos, consistiendo su importancia en la rápida migración de cualquier agente contaminante a través del medio del que forman parte los manantiales donde el rápido tránsito del agua se vuelve un factor de riesgo para la movilización de cualquier sustancia no deseada, aunque también los cambios repentinos en las concentraciones de tales sustancias pueden resultar benéficos como es el caso, ya que como se puede observar en la tabla anterior (tabla 10) los valores pueden fluctuar entre una época de lluvias y de estiaje y en este caso la concentración de nitratos baja drásticamente, atribuyéndose esto a la mezcla de agua de mejor calidad proveniente de la lluvia.

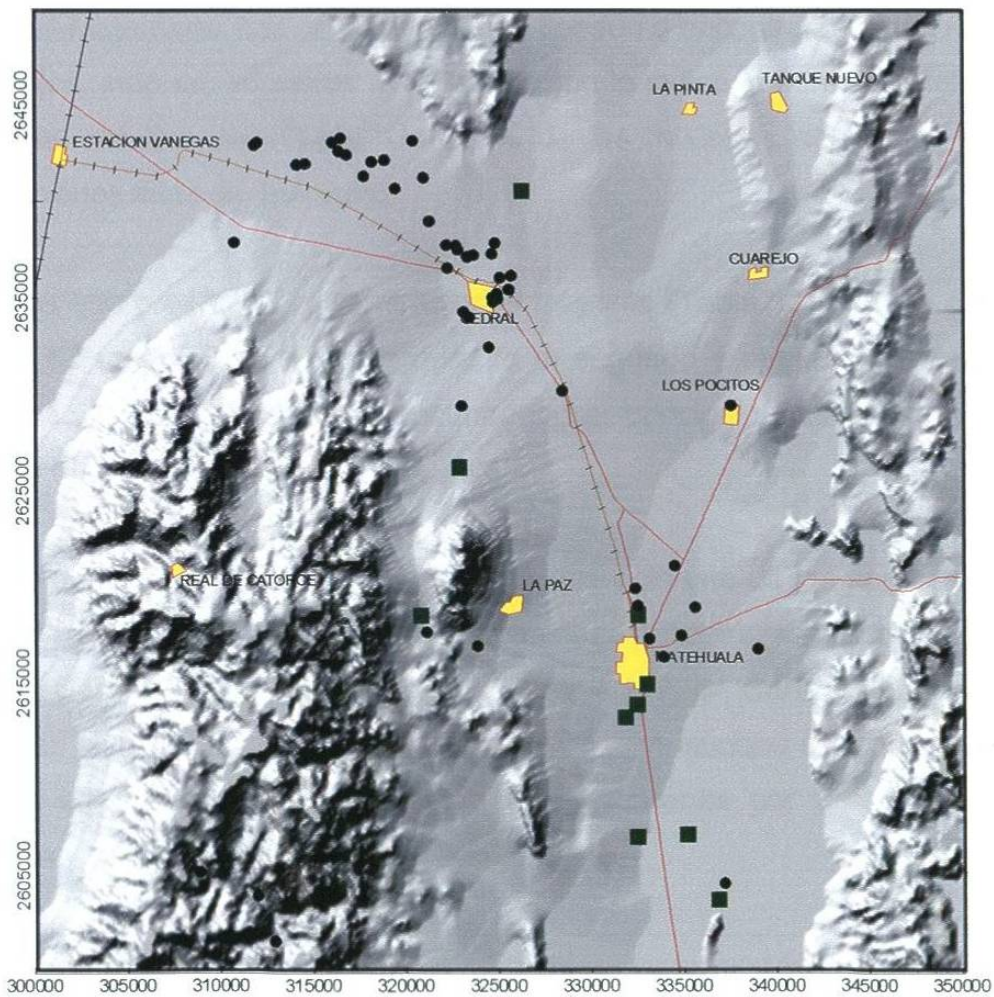

Figura 25. Localización de aprovechamientos muestreados para NO_3, Los puntos representan valores aceptables de NO_3. Los cuadrados aprovechamientos con valores por encima de la norma.

Durante el segundo muestreo en lo relativo a los valores de nitratos, solo se registraron algunos cambios notables en la composición de las muestras m39 y m47 pertenecientes a Matehuala y Piedrita Blanca, las cuales mostraron un incremento en el contendido de $N\text{-}NO_3$ (33.32 y 27.4 respectivamente), agregándose además una nueva muestra (m66) con un contenido de 15.9 mg/l N-NO3. Las muestras restantes permanecieron con valores muy cercanos a los obtenidos en la primera etapa de muestreo.

4.2.1.4. Fluoruros

La distribución de los fluoruros en toda el área de estudio se presenta de manera uniforme, es decir, sin grandes cambios entre una zona y otra dentro de la misma área Cedral-Matehuala. Las concentraciones tienden a encontrarse en su mayoría en valores bajos, esto es, inferiores a 1.5 mg/l como lo indica la norma oficial mexicana en su límite máximo permisible. Un 28 % de las muestras analizadas presentan concentraciones altas de fluoruros,

Los valores que presentan concentraciones mayores (Tabla 13) que los constituyen 19 de las 67 muestras analizadas durante el segundo y primer muestreo fluctúan entre los 1.51 mg/l y 1.8 mg/l, encontrándose principalmente en la Ciudad de Matehuala (Figura 25).

Por medio de la tabla 12 se puede comentar que solo uno de los aprovechamientos con más de 1.5 mg/l de fluoruro se utiliza con fines potables, siendo el pozo de agua potable de Cerrito Blanco que presenta 1.59 mg/l de flúor. Como se observa el valor está casi en el límite, sobrepasando apenas 0.09 mg/l, aunque esta misma fuente de suministro ha presentado ya presencia de otros iones por arriba de la norma establecida y es necesario observarlo atentamente.

Tabla 13. .Muestras con contenidos de fluoruro mayor al establecido por la norma mexicana.

Muestra	F mg/l	Uso	Localidad	Tipo
m17	1.51	Agrícola	Cedral	pozo
m20	1.64	Agrícola	Cedral	pozo
m21	1.70	Agrícola	Cedral	pozo
m22	1.60	Agrícola	Cedral	pozo
m37	1.65	Agropecuario	La Cruz	pozo
m38	1.64	Servicios	Matehuala	Noria
m39	1.54	Pecuario	Matehuala	pozo
m40	1.57	Servicios	Matehuala	pozo
m41	1.6	Servicios	Matehuala	pozo
m45	1.59	Potable	Cerrito Bco.	pozo
m46	1.83	Agrícola	Ojo de Agua	pozo
m52	1.6	Construcción	Rancho Nvo.	Tajo
m54	1.57	Agropecuario	Cerrito Bco.	Galería
m55	1.56	Agropecuario	Matehuala	Pozo
m56	1.62	Agrícola	Matehuala	Pozo
m57	1.71	Agrícola	Sarabia	Pozo
m63	1.77	Agropecuario	Ojo de Agua	Noria
m65	1.62	Pecuario	Ojo de Agua	Manantial
m66	1.54	Agrícola	Matehuala	Noria

Lo que se puede observar en el mapa siguiente es que la tendencia del flúor a aumentar se dirige hacia el este, y hacia el sur en las cercanías con la ciudad de Matehuala donde se registran los valores más elevados ilustrados en la tabla 12. También se presenta con claridad que toda la zona donde se sitúan los pozos de agua potable operados por SAPSAM para el suministro de agua potable para la población de Matehuala presentan características favorables con relación al ion fluoruro, por lo que no existe el riesgo de sufrir las afecciones provocadas por el exceso del mismo para los habitantes de Cedral y Matehuala.

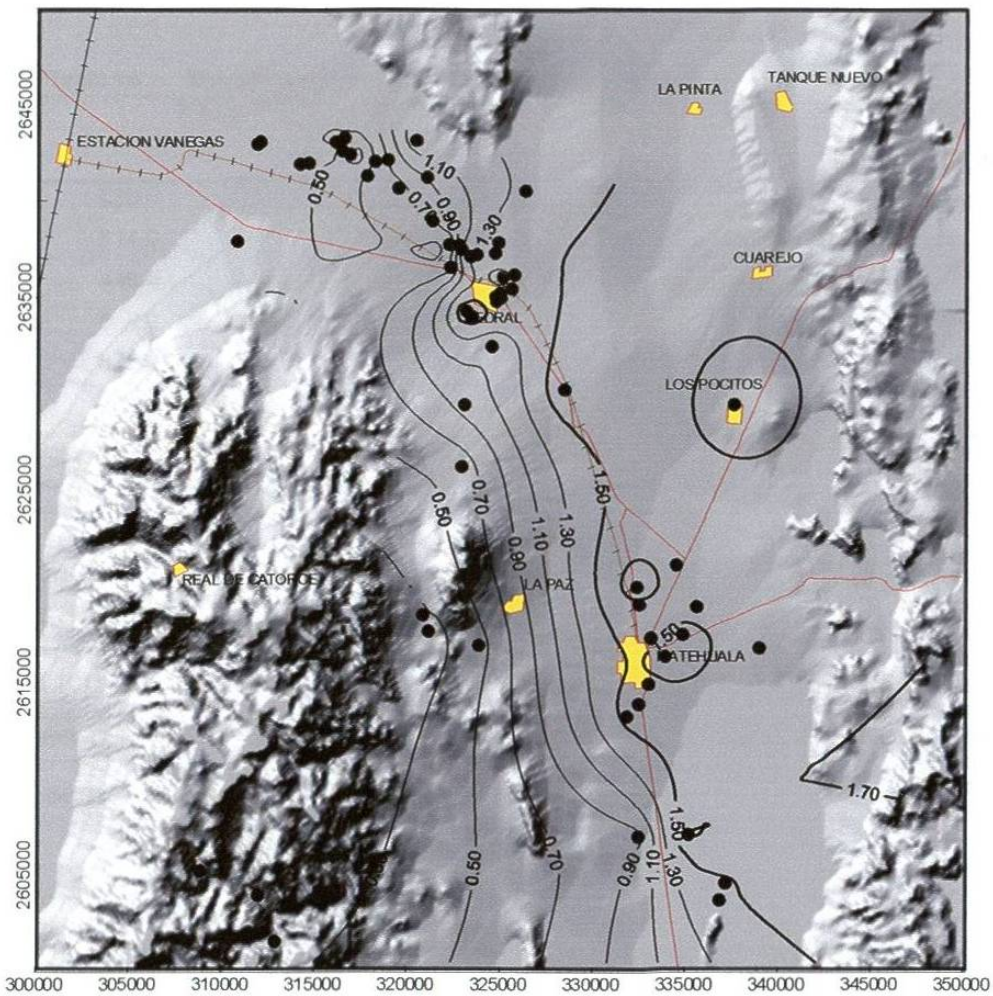

Figura 26. Comportamiento del fluoruro en los aprovechamientos muestreados.

4.2.2. CATIONES

4.2.2.1. Sodio

La concentración de este catión se presenta en la mayoría de las muestras de agua subterránea con valores muy bajos, solamente 7 se los 67 aprovechamientos muestreados presentan valores máximos a los permitidos (200 mg/l), los valores que exceden esté límite fluctúan de los 226 mg/l a los 836 mg/l. La tabla 13 describe de manera más detallada las muestras con valores altos de sodio.

Tabla 14. Muestras con contenidos de sodio mayores al límite permisible.

MUESTRA	Na mg/l		UBICACIÓN	TIPO	USO	PROF. M
	1*	2**				
M7	630.0	554.0	C de Flores	Pozo	Agropecuario	150
M39	814.0	768.0	Matehuala	Pozo	Servicios	120
M47	446.0	349.0	Piedra Blanca	Pozo	Agrícola	¿
M55	568.0	n.m.	Matehuala	Pozo	Agrícola	156
M56	836.0	806.8	Matehuala	Pozo	Servicios	¿
M57	226	207	Sarabia	Pozo	Pecuario	24

La Norma oficial mexicana marca un límite de 200 mg/l de Na
* primer muestreo (marzo 2003). ** segundo muestreo (noviembre 2003).

Como se puede observar en la tabla 13, los contenidos altos de sodio se limitan a la zona sur del área de estudio, a excepción del la muestra m7. El valor promedio de sodio para toda el área es de 51.5 mg/l, aunque para la zona de Matehuala el valor promedio es de 238.9 mg/l de sodio, descendiendo el valor de ambos promedios durante el segundo muestreo.

4.2.2.2. Potasio

El potasio al ser un elemento muy estable, se presenta en toda la zona con rangos de valores muy cercanos entre sí. El valor mínimo es de 0.51 mg/l y el máximo de 30.0 mg/l, más específicamente todos los valores a excepción de este último se encuentran entre los 0.51 mg/l y los 19 mg/l, teniéndose un promedio para toda la zona de 6.6 mg/l de potasio. Para la zona norte (Cedral) el valor promedio de potasio es de 5.0 mg/l (3.4) mientras que para la zona de Matehuala es de 11.3 mg/l (13.0) y para las cercanías a la Sierra de Catorce se registra un promedio de 3.4 mg/l de potasio (4.0). Durante el segundo muestreo los valores tuvieron solo pequeñas fluctuaciones (3.4, 13.0 y 4.0 mg/ de potasio para las tres zonas respectivamente como promedio).

4.2.2.3. Calcio y Magnesio

Las concentraciones de calcio y magnesio se determinaron como dureza total en términos de $CaCO_3$,. Un total de 58 muestras del total de las muestras analizadas

presentaron valores superiores a los 500 mg/l, valor que es el límite permisible dentro de la norma mexicana. A pesar que la mayor parte del área presenta elevada dureza, la distribución de la misma tiene cierta tendencia de aumentar hacia la parte sureste de toda la zona como se aprecia en la figura 27. Los valores más bajos y que son los que se encuentran dentro del límite establecido por la norma lo constituyen los manantiales localizados al pie de la Sierra de Catorce, y algunos otros aprovechamientos cercanos a la misma, además de 2 localizados en la parte norte mientras que los más altos se encuentran dentro de la ciudad de Matehuala como se observa en la siguiente figura.

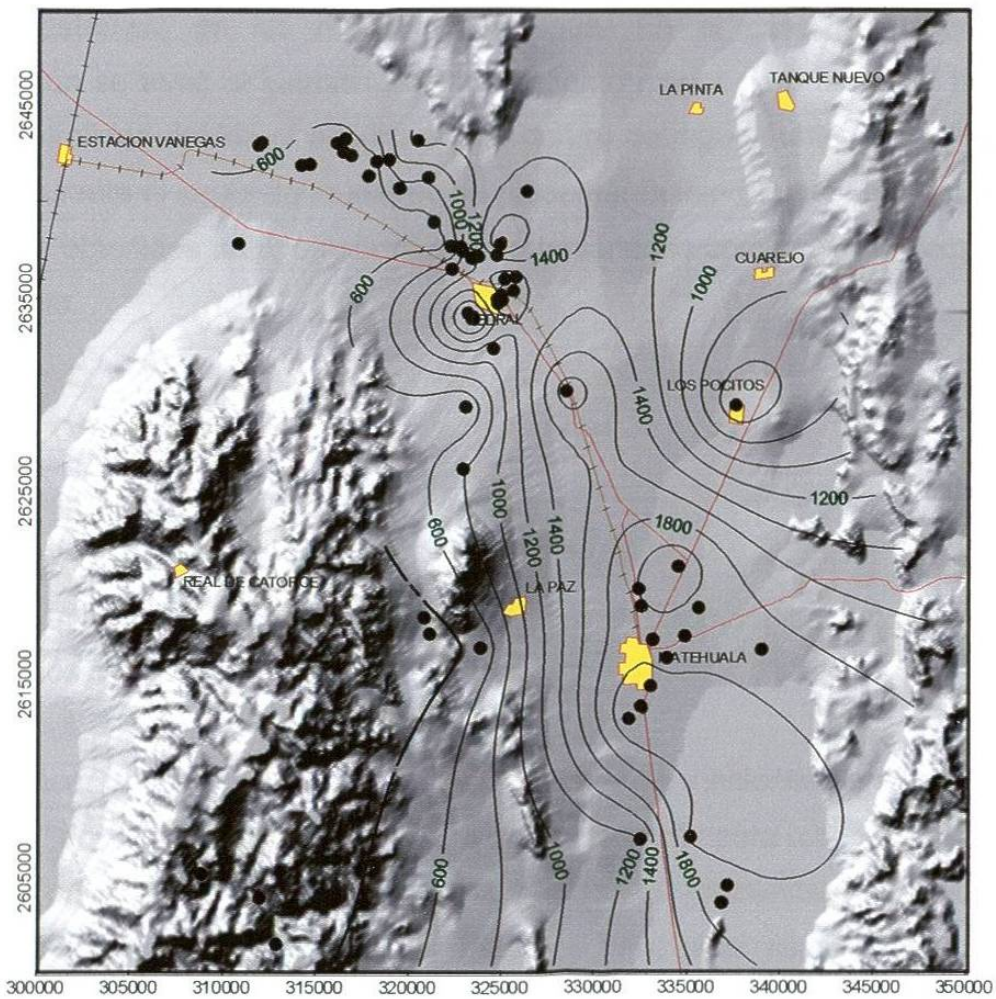

Figura 27. Distribución espacial de la dureza a través del área de estudio.

Se puede apreciar en el mapa anterior con claridad que casi la totalidad del área de estudio presenta problemas de dureza, donde los rangos de los valores son elevados, registrando para los aprovechamientos que sobrepasan la norma mexicana (500 mg/l $CaCO_3$) un promedio de 1312.6 mg/l $CaCO_3$ con valores máximos y mínimos de 2215 y 501.6 mg /l $CaCO_3$ respectivamente.

4.2.2.4. Estroncio

Aunque dentro de la norma mexicana no se muestran los límites permisibles de este catión, es relevante su presencia en casi la totalidad de las muestras analizadas, presentándose valores elevados tales como 17.6 mg/l, teniéndose en promedio 7.23 mg/l de estroncio en las muestras de agua. En el caso particular de esta investigación se tomó al estroncio como elemento mayor para fines del balance de electroneutralidad debido al alto contenido dentro del agua subterránea del área de estudio. Durante el segundo muestreo se presentaron importantes modificaciones en los valores obtenidos en el primer muestreo teniéndose como valor máximo 9.9 mg/l de estroncio.

4.3. GRUPOS DE AGUA

4.3.1. Diagramas de Piper

Para determinar la familia de agua a la que pertenecen los aprovechamientos muestreados se utilizó el diagrama de Piper.

Esta clasificación se basa en el contenido de cationes y aniones en meq/l colocados dentro de dos triángulos equiláteros graduados, uno para cationes y otro para aniones y en el centro de ambos un rombo donde se intersectan por medio de una línea recta los contenidos de cationes y aniones para cada muestra. La clasificación obtenida se expone en la figura 28.

Se obtuvieron de manera general 7 familias de agua que son 1)familia cálcica sulfatada, 2) familia cálcica –sulfatada bicarbonatada, 3) familia cálcica sódica-

sulfatada, 4) cálcica-bicarbonatada sulfatada, 5)cálcica sódica-sulfatada bicarbonatada, 6)cálcica-bicarbonatada y 7) sódica cálcica-sulfatada.

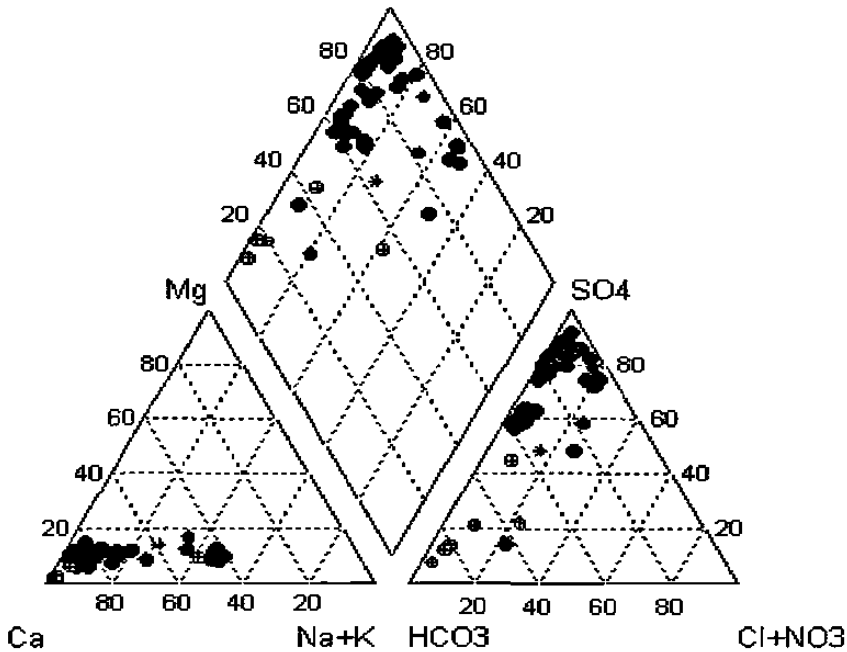

Figura 28. Clasificación de las muestras de agua por medio de diagrama de Piper.

Dentro de las 7 familias de agua identificadas, la cálcica-sulfatada es la que alberga a la mayor parte de las muestras, con un 50.7% del total. Las muestras de esta familia se dispersan en una franja de norte a sur desde Cedral hasta Matehuala y más al sur, otro grupo donde se sitúa buena parte de las muestras lo forman aguas de la familia cálcica-sulfatada; localizándose solo en la parte norte del área de estudio, específicamente en la parte oeste de Cedral, donde la mayor parte de esos aprovechamientos pertenecen a SAPSAM. Otro grupo presente lo constituyen muestras de agua de la familia cálcica sódica-sulfatada que lo conforman muestras que se diseminan en la parte norte (Cerro de Flores) y en la parte sur específicamente en Matehuala y Piedra Blanca (apéndice I).

La tabla siguiente ilustra de manera más clara la distribución de las muestras dentro de cada grupo de agua resultante (Tabla 15).

Tabla 15. Distribución de las muestras de agua subterránea en los diferentes grupos de agua (AquaChem 4.0).

GRUPOS	MUESTRAS
$Ca\text{-}SO_4$	1-6, 8, 9, 10, 11, 17, 19-23, 29, 30, 37, 38, 40, 41,44-46, 49, 51-54, 57, 58, 63, 65, 66.
$Ca\text{-}SO_4\text{-}HCO_3$	12-16, 24-28, 31, 43, 50, 59, 64, 67.
$Ca\text{-}Na\text{-}SO_4$	18, 36, 39, 55
$Ca\text{-}HCO_3\text{-}SO_4$	32, 48
$Ca\text{-}HCO_3$	33, 60-62
$Ca\text{-}Na\text{-}SO_4\text{-}HCO_3$	34, 42
$Na\text{-}Ca\text{-}SO_4$	7,35,47, 56, ,

4.3.2. Diagramas de Stiff

Se hizo una clasificación adicional tomando como base los diagramas de Stiff (Hem, 1985), donde se calculan los valores de cationes y aniones en meq/l y graficando cationes y aniones en una figura de tres ejes (Figura 29).

De acuerdo a la clasificación hecha en los Diagramas de Stiff las aguas del grupo 1 son aguas clasificadas como aguas de media salinidad para uso agrícola con los valores más bajos de conductividad eléctrica (< a 800 μS), mientras que las muestras de agua del grupo 2 son aguas de alta salinidad con valores de conductividad eléctrica mayores a 800 μS y. las muestras de agua del grupo 3 son aguas de muy alta salinidad con valores de conductividad eléctrica mayores de 1250 μS. La distribución de las muestras dentro de cada uno de estos grupos sigue siendo similar a las anteriores clasificaciones. Las muestras del grupo 1 se distribuyen principalmente en los aprovechamientos cercanos a la Sierra de Catorce, las muestras del grupo dos se localizan en los aprovechamientos de la parte norte del área de estudio (Cedral y Vanegas) y las muestras del grupo 3 pertenecen a los aprovechamientos de Matehuala. Esta distribución se puede observar en la figura 29.

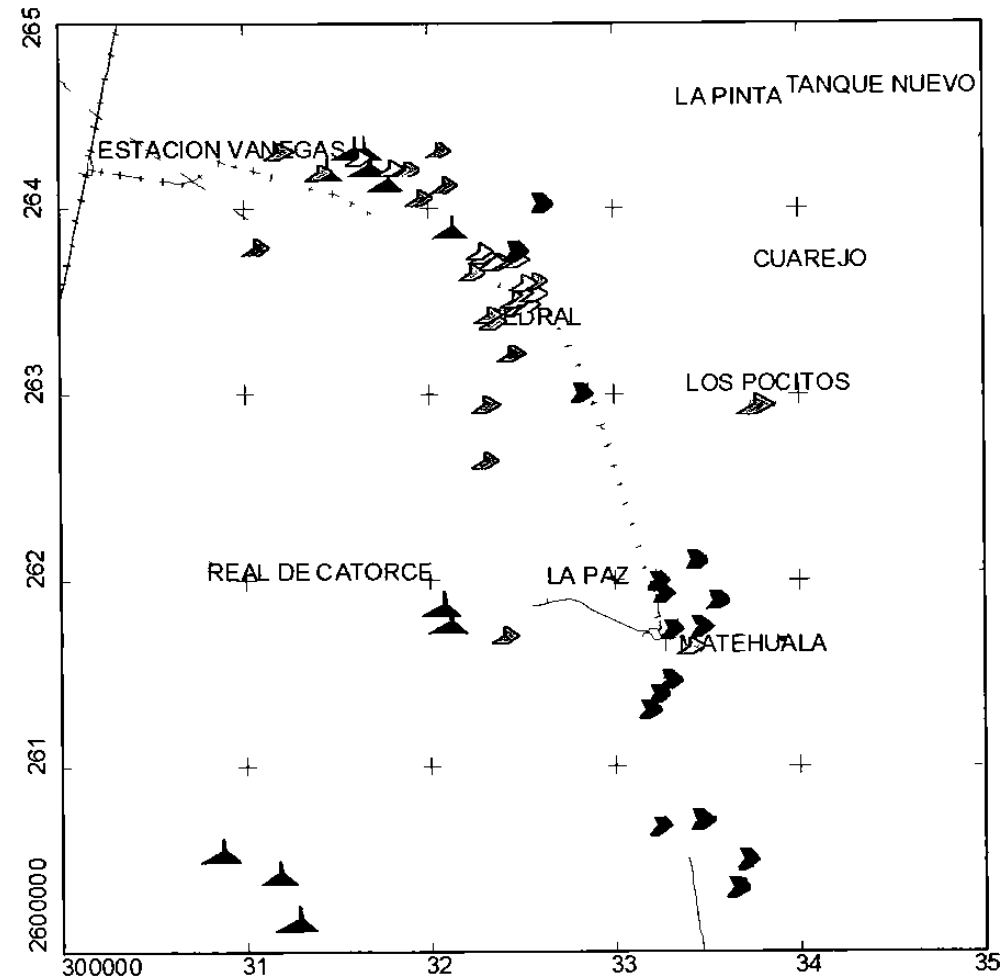

Figura 29. Clasificación por medio de Diagramas de Stiff..

4.3.3. Calidad del agua para consumo humano.

De acuerdo a los resultados de laboratorio se establece que los aprovechamientos utilizados con fines potables presentan una calidad buena salvo algunas excepciones. La siguiente tabla provee información esencial de los pozos, norias y manantiales de los que se extrae agua para consumo humano.

Tabla 16. Química de los aprovechamientos de agua para uso doméstico.

Muestra	pH	STD mg/l	Dureza mg/l $CaCO_3$	SO_4 mg/l	N-NO3 mg/l	F mg/l	As ppb	Fe ppb
m9	6.85	996	1148.90	849.6	1.5	1.17	1.95	546.10
m10	6.95	860.25	972.00	745.22	1.6	1.05	2.04	426.16
m11	6.9	893.25	1038.80	735.36	1.5	1.07	1.86	453.04
m12	7.09	537.75	509.90	307.2	3.2	0.05	2.28	219.70
m13	7.1	527.25	512.40	302.88	1.8	0.48	3.40	234.49
m14	7.11	522.75	524.90	302.88	1.5	0.44	2.68	229.34
m15	7.07	543	501.60	327.84	1.8	0.54	1.06	220.66
m16	6.94	663.75	687.70	392.64	3.7	0.56	0.85	308.90
m24	6.90	660	650.40	360	1.2	0.58	0.88	268.56
m25	7.14	495.75	470.90	269.76	1.5	0.56	2.68	188.61
m26	7.08	612.75	514.00	360.00	1.2	0.53	4.66	215.27
m28	7.20	775.5	739.30	557.76	1.3	0.63	2.05	224.84
m32	7.26	425.25	362.10	79.96	10.4	0.28	1.38	157.14
m33	7.02	378.75	329.80	43.99	6.8	0.23	0.50	157.26
m34	7.05	726	448.80	300	9.6	0.42	0.26	191.22
m35	7.30	855	393.40	312.5	6.1	0.97	2.03	163.75
m36	7.02	1259.25	790.40	612.48	10.4	0.58	0.45	330.66
m42	7.51	751.5	417.60	285	3.4	1.41	7.78	145.92
m45	7.15	2025	1886.80	1750	6.5	1.59	18.79	895.70
m48	7.65	281.25	573.90	50	2.4	0.30	10.74	262.40
m53	6.68	1575	1909	1800	3.0	1.4	849	1033.3
m59	–nm	nm–	284.20	350	6.5	0.48	0.80	556.21
m60	8.12	332.25	284.2	36	1.6	0.25	8.56	218.03
m61	7.95	277.5	231.2	18	2	0.13	1.35	150.01
m62	7.62	363	315.5	36	2.4	0.16	1.99	183.28
Límite	**6.5-8.5**	**1000**	**500**	**400**	**10**	**1.5**	**30**	**300**

nm=no medido.

Como lo muestra la tabla anterior, la mayoría de los pozos que se utilizan con fines domésticos cumplen con las normas nacionales de calidad del agua para uso y consumo humano con respecto a parámetros como el pH que se encuentra entre los 6.5 y los 8.5 establecidos por la norma mexicana. Igualmente la mayoría de las muestras de estos aprovechamientos presentan valores de sólidos totales disueltos que se encuentran dentro del rango marcado por la misma norma (1000 mg/l). Sin embargo más del 50% de las fuentes de suministro de agua potable sobrepasan los

500 mg/l de $CaCO_3$ expresados como dureza; en lo relativo al contenido de sulfatos también existen algunos pozos con registros mayores de los 450 mg/l. los pozos presentan concentraciones de arsénico mayores a los 10 ppb que es el límite marcado por la OMS para este elemento traza, estos son los pozos de la comunidad de Cerrito Blanco y de Pastoriza que es la comunidad localizada en el límite sur del área de estudio, no obstante que el agua de este aprovechamiento presenta excelentes condiciones de dureza, STD y sulfatos. Las concentraciones de fierro sobrepasan el valor de 300 mg/l como límite para uso potable, estos son los pozos Cedral (m9, m10, m11, m16 y m59), Cerrito Blanco (m45) y Blanco de Arriba (m36).

4.4. Elementos Traza

Los elementos traza son definidos como aquellos elementos que generalmente ocurren en el agua a concentraciones de 1 mg/l o menores. Aquellos analizados en este trabajo son: Li, B, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Cd, Sb, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sa, Eu, Gd, Dy, Er, Yb, Re, Tl, Th, Pb y U. Sin embargo no se detectaron valores por encima del límite de detección del método ICP-MS utilizado, por lo que se realizó una depuración conservando únicamente aquellos que presentaron valores.

Otro elemento traza importante dados los elevados contenidos dentro de las muestras de agua analizadas es el Fe, cuyos contenidos registran un promedio de 548.4 ppb en toda el área de estudio. Las muestras que registran valores mayores a 300 ppb, que es el límite establecido por la SSA (NOM-SSA1-127- 1994), promedian en 724 ppb, mientras que las muestras con valores menores a este límite máximo se tienen en un promedio de 206 ppb. La zona de Cedral presenta un valor promedio de 457 ppb, mientras que la parte sur perteneciente a Matehuala casi dobla ese valor (867.4 ppb), la zona con los valores más bajos es la perteneciente a las cercanías de la Sierra de Catorce con un valor de Fe promedio de 271.6 ppb.

De las 41 muestras que rebasan el límite permitido por la norma mexicana solo 7 de estas son usadas con fines potables (Tabla 17).

Tabla 17. Muestras de agua con contenidos de Fe mayores a 300 mg/l usados con fines potables.

Muestra	Fe (ppb)	pH	Eh (µS/cm)	localidad	tipo
m9	546	6.9	303.8	Cedral	Pozo
m10	425	7.0	346.5	Cedral	Pozo
m11	453	6.9	354.3	Cedral	Pozo
m16	309	6.9	344.4	Vanegas	Pozo
m36	331	7.02	291.2	Bco. de Arriba	Pozo
m45	896	7.15	381.9	Cerrito Bco.	Pozo
m59	556	n.m	n.m.	Cedral	Pozo

nm = no medido en campo.

4.5. ARSÉNICO

Otro elemento traza que se encontró en elevadas concentraciones en algunos de los sitios muestreados, y que debido a su reconocida toxicidad es de gran importancia para efectos de la interpretación hidrogeoquímica, el arsénico. Este elemento se presenta en concentraciones que abarcan desde los 0.26 ppb hasta 13 160 ppb, con un promedio de 545 ppb.

De las 67 muestras de agua subterránea tomadas en la zona Cedral-Matehuala se obtuvieron algunos puntos (Tablas 18 y 19) con concentraciones de arsénico superiores a 0.03 mg/l o 30 ppb que es el límite establecido por la norma mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

De acuerdo a los resultados arrojados en las últimas investigaciones llevadas a cabo por diversos científicos (Smedley y Kinniburgh, 2002) la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la USEPA (United States Environmental Protection Agency) han establecido un límite máximo permisible para agua de uso y consumo humano con un valor de 10 ppb, este parámetro junto con la norma oficial mexicana (NOM-127-SSA- 1994) serán considerados para la determinación del grado de contaminación de los aprovechamientos muestreados en este trabajo.

Los resultados obtenidos se detallan en las siguientes tablas:

Tabla 18. Muestras que presentan contenidos elevados de arsénico, sobrepasando la NOM-127-SSA-1994.

Muestra	As ppb 1er muestreo	2° muestreo	Lugar	Uso
m 38	66	131	Matehuala	Agrícola
m40	13160	12310	Matehuala	Servicios
m41	9480	9510	Matehuala	Servicios
m44	834	540	Matehuala	Servicios
m46	391	292	Ojo de Agua	Pecuario
m49	582	115	Santa Lucía	Agrícola
m52	54	115	Rancho Nuevo	Construcción
m53	849	1973	Matehuala	Doméstico
m54	8162	4366	Cerrito Blanco	Agropecuario
m63	nm	69	Ojo de Agua	Agropecuario
M66	nm	107	Matehuala	Agrícola

nm No muestreado
Se toma como base la NOM-127-SSA-1994 (30 μg/l)

Comparando con la norma de la OMS y USEPA habrá que añadir 7 muestras más

Tabla 19. muestras que rebasan el límite máximo de arsénico en agua para uso y consumo humano establecido por la OMS.

Muestra	As ppb 1er muestreo	2° muestreo	Lugar	Uso
m21	<10	13	Cedral	Agrícola
m37	<10	13	La Cruz	Agropecuario
m39	10.08	13	Matehuala	Pecuario
m45	19	10	Cerrito Blanco	Potable
m48	11	nm	Pastoriza	Potable
m57	17	<10	Sarabia	Agrícola
m58	18	17	E. de Abajo	Agrícola
m65	nm	23	Ojo de Agua	Pecuario

nm- No muestreado
La norma mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece como límite máximo 30 μg As/L.
El límite máximo de As establecido por la OMS es 10 μg As/L.

Como se aprecia en las tablas anteriores, las muestras con contenidos altos se encuentran distribuidas dentro de un amplio rango, encontrándose un valor máximo (13160 ppb) excesivamente elevado y un valor mínimo de 54.40 ppb, todos los demás valores están ampliamente distribuidos dentro de este rango. El principal uso

a que se le destina al agua extraída de estos aprovechamientos es a la actividad agrícola, además de que algunos pozos son de uso privado, por lo cual el uso que se le da al agua extraída de estos es muy variado, aprovechándose para uso doméstico incluso llegándose a ingerir en algunos casos, o bien como agua para riego de huertos familiares, etc.

El valor promedio de las muestras con contenidos bajos (menores a 10 ppb) de arsénico es de 3 ppb, mientras que para las muestras con valores elevados de arsénico el promedio es de 2464 ppb.

De acuerdo con la distribución espacial de la concentración de arsénico (Figura 30), es en la parte sur del área donde se localizan los aprovechamientos que presentan altas concentraciones de arsénico, principalmente en la ciudad de Matehuala en la parte este es donde se tienen los valores más altos de arsénico, aunque hacia el sur de la misma ciudad también se encuentran aprovechamientos con contenidos significativos de arsénico (Santa Lucía, Pastoriza y Encarnación de Abajo) que rebasan las 10 ppb

Durante el segundo muestreo algunos de los puntos con altos contenidos de arsénico registraron cambios importantes en la concentración del mismo, como se puede apreciar en las tablas 18 y 19. Para este segundo muestreo se obtuvo un promedio de 1846 ppb aunque dadas las cantidades tan elevadas, este cambio en las concentraciones desde un enfoque general no es tan alentador como en un principio lo parece, ya que los valores máximos registrados durante el primer muestreo solo registran un decremento de 6.5 %.

Otro aspecto relevante a considerar es la profundidad de los aprovechamientos con altos contenidos de arsénico; en todos ellos la profundidad al nivel estático no es mayor a 20 m, la profundidad total de los pozos es variada, aunque por lo regular dentro de la ciudad de Matehuala los aprovechamientos no son muy profundos, ya que muchos de ellos en inicio fueron norias excavadas manualmente. Para los pozos

situados en la ciudad de Matehuala se midieron profundidades máximas al nivel estático de 19.8 m.

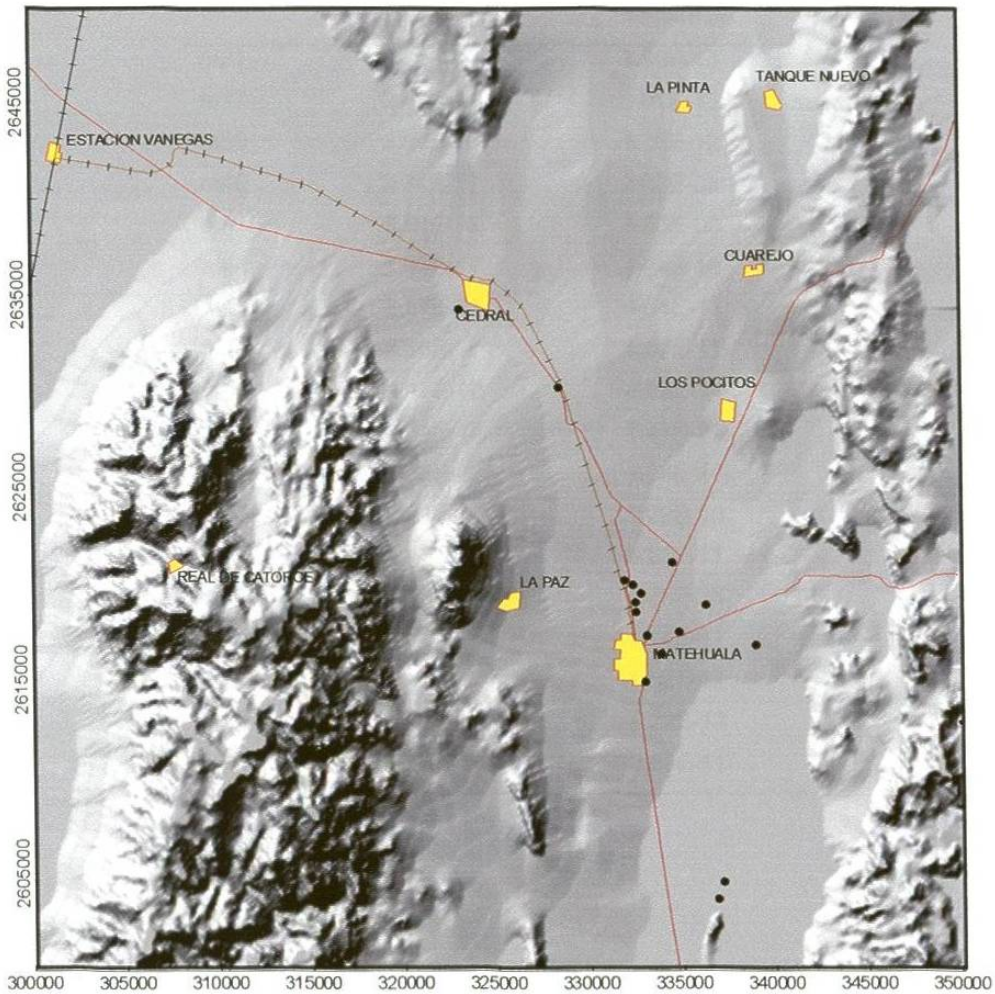

Figura 30. Mapa donde se pueden observar los puntos donde se tienen concentraciones de arsénico superiores al límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994.

La especiación calculada (Tabla 20) para diferentes especies iónicas, se observa que la especie dominante de es el As(V), que es la especie de menor toxicidad, aunque como se menciona en el primer capítulo una vez ingerida cualquiera de las dos especies, podría repercutir en similares niveles toxicológicos.

Tabla 20. Especies de arsénico dominantes en las muestras que manifiestan contaminación (valores obtenidos por medio del programa PHREEQC).

muestra	As (III) mmol(eq)/L	As (V) mmol(eq)/L
m21	1.39E-09	7.68E-13
m37	2.47E-18	3.01E-13
m39	3.40E-19	1.05E-12
m40	2.74E-17	2.38E-09
m41	9.61E-17	1.53E-09
m44	1.33E-17	1.24E-10
m45	2.87E-21	4.54E-13
m46	3.86E-17	1.67E-11
m48	4.17E-19	4.59E-14
m49	2.44E-18	7.41E-11
m52	4.23E-23	4.68E-14
m53	3.91E-15	1.29E-10
m54	1.15E-20	8.55E-11
m57	6.93E-18	1.38E-13
m58	7.70E-21	1.14E-12
m63	3.45E-17	1.62E-12
m65	2.97E-18	4.22E-13
m66	3.36E-16	1.35E-11

4.6. Índices de saturación de minerales.

Un mineral en contacto con el agua subterránea representa un sistema geoquímico que consiste de una fase sólida y una fase en solución. Si la solución inicialmente no contiene ninguno de los componentes del mineral, entonces existe desequilibrio entre las fases y el mineral disolverá para proveer componentes a la solución.

Los cálculos de equilibrio mineral para una muestra de agua subterránea son de utilidad para predecir la presencia de minerales reactivos en el sistema utilizando los índices de saturación para ello. Debido a incertidumbres inherentes a los cálculos de los índices de saturación (IS), en diversos trabajos se ha considerado un rango de valores para índices de saturación cercano a cero dentro de la zona de equilibrio. SI = ±(5%) (log Keq).

Si el índice de saturación para un mineral calculado es menor que cero, el agua está subsaturada con respecto a ese mineral, esto significa que el mineral no puede precipitar de la solución y deberá disolverse si está presente dentro de la solución para alcanzar el equilibrio. En caso de sobresaturación (cuando el índice de saturación es mayor a cero) entonces el mineral no es reactivo. Si el mineral fuera reactivo, este limitaría la concentración de sus constituyentes a valores que producirían un índice de saturación cercano a cero. En esto juega un papel importante las constantes de equilibrio (Keq), ya que es necesario obtener los valores de la misma de las reacciones más importantes para el posterior cálculo del índice de saturación en el agua con relación a diversos minerales.

La constante de equilibrio expresa la relación constante de las actividades de los reactantes presentes cuando las velocidades de reacción se han igualado.

La constante de equilibrio se define en términos de actividades (concentraciones activas), la forma más común de expresarla es mediante la concentración molar de las especies en solución.

$$Keq = \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_D^d}$$ (Actividades de los productos) (Actividades de los reactantes)

El índice de saturación se utiliza para determinar el estado de equilibrio de la solución con relación a diversos minerales:

$$IS = \log \frac{(PAI)}{(K_{eq})}$$ Producto de actividad iónica Constante de equilibrio

El producto de acividad iónica se obtiene: (Ejemplo calcita)

$CaCO_3 \leftrightarrow Ca^{+2} + CO^{-2}_3$ $\quad PAI_{calcita} = a_{Ca^{+2}} a_{CO_3^{-2}}$

Las siguientes figuras que muestran los valores de saturación para diversos minerales obtenidos por medio de PRHEEQC indican el grado de saturación de los minerales más comunes y que están presentes en el sistema acuífero de acuerdo a los datos termodinámicos y químicos introducidos al programa para los diversos cálculos.

4.6.1 Calcita

Como se observa en la figura siguiente (Figura 31), la mayoría de las muestras analizadas se encuentran en equilibrio con respecto a la calcita. Las muestras del grupo 3 son las que se encuentran en su totalidad dentro de la franja de equilibrio limitada por las dos líneas discontinuas que indican los límites superior e inferior para el estado de equilibrio respectivamente; algunas muestras del grupo 2 (manantiales de la Sierra de Catorce y pozo del límite sur del área de estudio) se encuentran en estado de supersaturación , por lo que se esperará que en la zona donde se ubican geográficamente se presente precipitación de calcita.

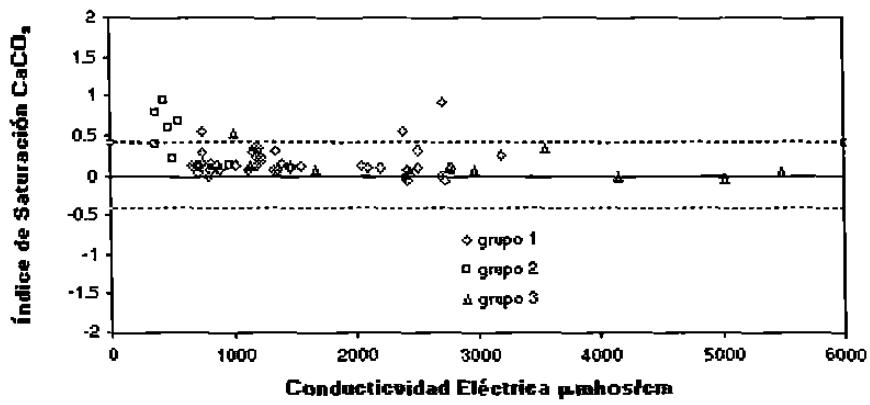

Figura 31. . Saturación del agua subterránea con respecto a la calcita.

4.6.2. Yeso

La gráfica de saturación de yeso (Figura 32) deja ver claramente la tendencia del agua subterránea de alcanzar el equilibrio a través del tránsito del flujo, ya que al inicio de su recorrido, expuesto por las muestras de los grupos 1 y 2 principalmente los cuales tienen los valores más bajo de conductividad eléctrica se encuentran

subsaturadas, y conforme avanza en la dirección de flujo se va enriqueciendo, hasta alcanzar el equilibrio, que es la zona donde se sitúan las muestras del grupo 3 y esto está definido principalmente por la profundidad de algunos pozos, ya que comparten la característica de ser mayores a los 100 m.

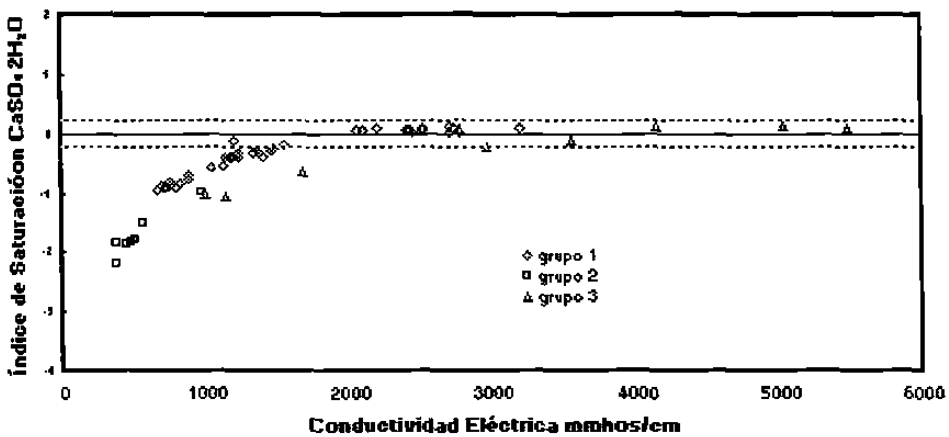

Figura 32. Saturación con respecto al yeso.

4.6.3. Siderita

La siderita como se puede ver en la figura siguiente (Figura 33) presenta subsaturación en toda la el área de estudio, a pesar de los altos valores de fierro registrados a través de una amplia zona, este mineral que se considera un control de la solubilidad del yeso se encuentra en valores negativos.

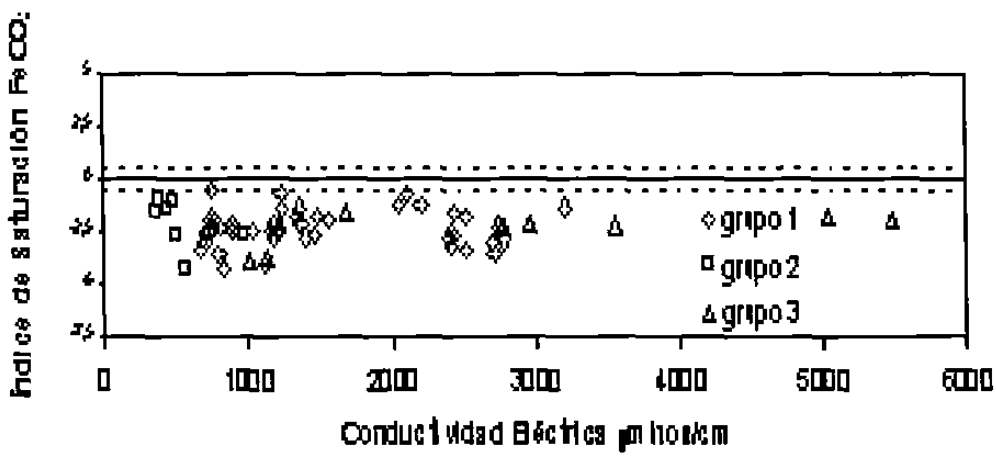

Figura 33. Saturación de siderita.

4.6.4. Fluorita

De acuerdo a los datos obtenidos por medio del software PHREEQC para los índices de saturación, el contenido de fluorita en el agua subterránea del área de estudio se encuentra una zona cercana al equilibrio y otra en equilibrio como se observa en la figura 34. Las muestras de agua del grupo 2 muestran evidente subsaturación, al igual que algunas de las muestras pertenecientes al grupo mientras que la mayoría de las muestras que conforman el grupo 3 se sitúan dentro de la franja de equilibrio.

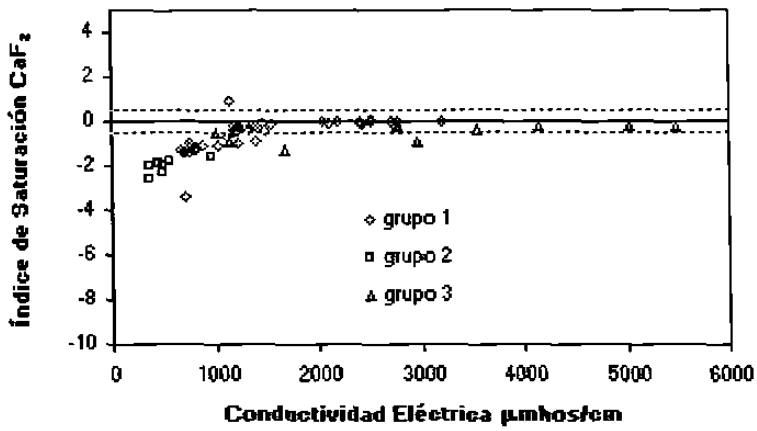

Figura 34. Saturación de la fluorita.

4.6.5. Estroncianita

En relación con la estroncianita, el agua subterránea del área de estudio en su totalidad se encuentra subsaturada con respecto a la misma, los altos contenidos de estroncio presentes en el agua subterránea del acuífero de Cedral-Matehuala, continuarán incrementando hasta alcanzar el equilibrio si aún hay disponibilidad en la fase sólida

.

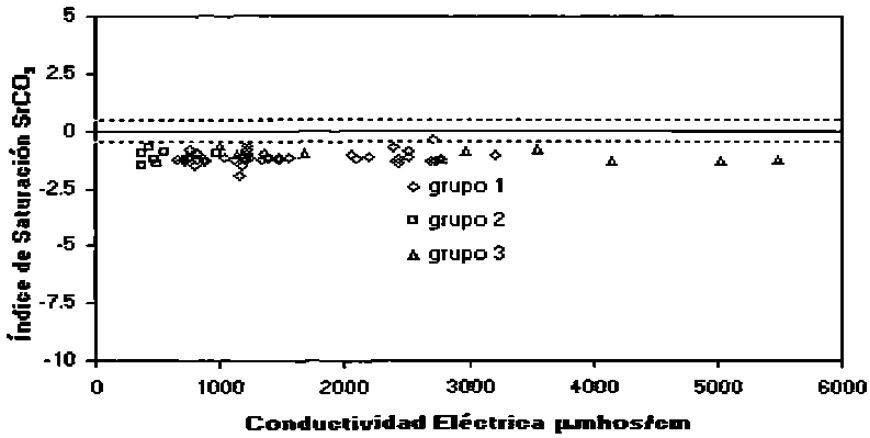

Figura 35.
Saturación de estroncianita.

4.7. Profundidad al Nivel Estático

En lo que respecta a la profundidad de los niveles estáticos en el área de estudio, se tienen marcadas diferencias de las que ya se han hablado en el primer capítulo de este trabajo. Los niveles estáticos para octubre del 2003 presentan mayores profundidades en la parte norte de Cedral respecto a los valores medidos en marzo del mismo año y que corresponden desde el concepto de los sistemas de flujo a una zona de descarga con fuerte explotación, registrándose lecturas de profundidad del nivel estático del orden de 72 metros, aunque es posible encontrar niveles más profundos en la zona donde operan los pozos de SAPSAM donde no fue posible medir los niveles estáticos debido a la extracción ininterrumpida.

La parte norte de Cedral, donde se observan los niveles estáticos más profundos y por lo tanto el cono de abatimiento del que se ha hablado en el primer capítulo de este trabajo, corresponde a la ubicación de los pozos operados por SAPSAM y además a la zona agrícola más importante del área de Cedral, que es donde se encuentra un número significativo de aprovechamientos; de éstos se extraen las cantidades mayores de agua.

En la figura 36 se muestra la distribución de la profundidad del nivel estático en toda el área Cedral-Matehuala. En el se pueden apreciar claramente los puntos expuestos con anterioridad.

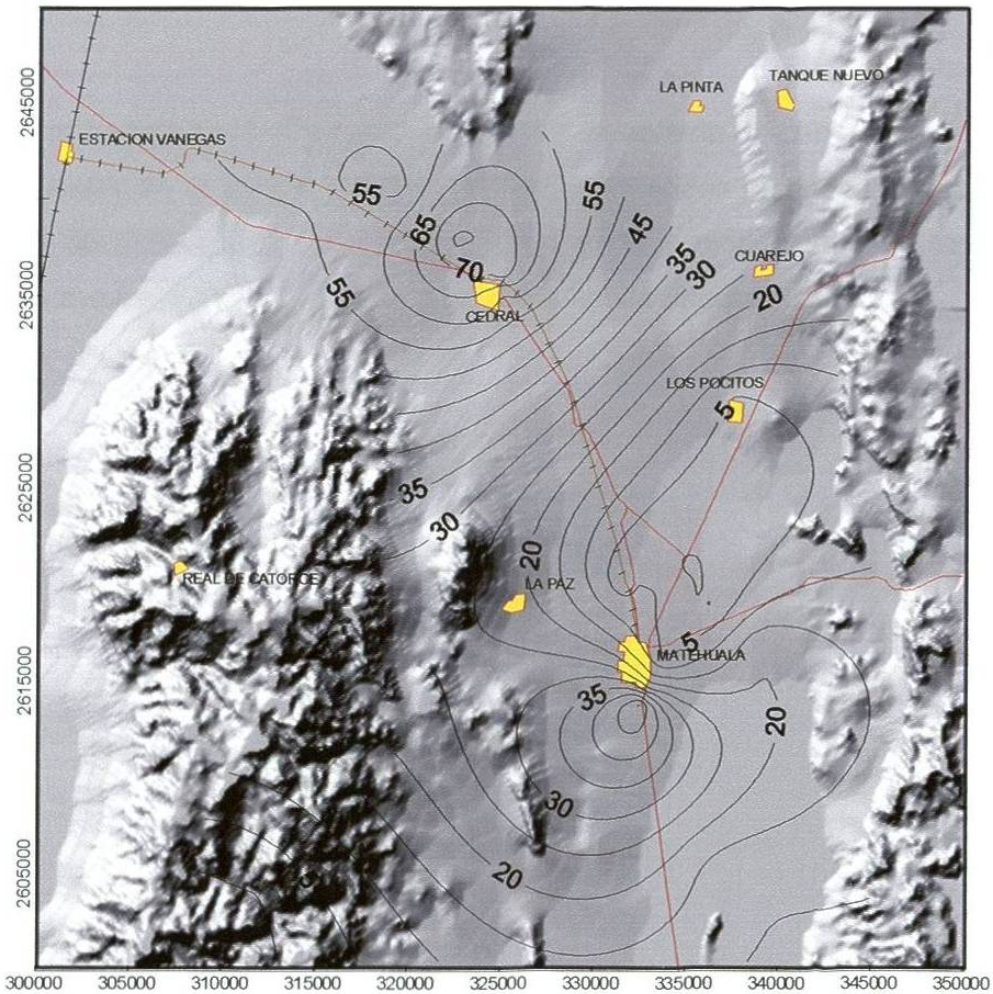

Figura 36. Distribución de la profundidad al nivel estático para octubre 2003

En dirección al sur, los niveles estáticos van presentando disminuciones en su profundidad comportándose de una manera uniforme, acercándose a Matehuala se observa una repentina elevación del nivel estático debido al punto m42, donde se localiza una galería filtrante de poco más de 3 metros de profundidad del nivel estático, además del manantial de Ojo de Agua y los canales de Cerrito Blanco, también es importantes señalar que los aprovechamientos situados dentro de la

ciudad corresponden a extracciones mínimas, llegando en algunos casos a pasar hasta dos meses entre un primer y segundo periodo de extracción donde le aprovechamiento no sobrepasa las 10 horas de operación, aunque esto solo es válido para los pozos o norias situados dentro de la ciudad y en la zona de ojo de agua.

Dentro de la ciudad de Matehuala nuevamente se aprecia un cono de abatimiento en la parte sureste de la misma, donde los niveles estáticos alcanzan nuevamente los 50 metros de profundidad en algunos pozos (m55 y m56) y que es también una importante zona agrícola de Matehuala con fuertes extracciones.